

ЗЕМЛЯРОБСТВА І РАСЛІНАВОДСТВА**AGRICULTURE AND PLANT CULTIVATION**

УДК 633.11«321»:539.16.04:546.36:631.83/.84:631.445.12

DOI: 10.29 235/1817-7204-2018-56-2-164-174

Поступила в редакцию 15.06.2017

Received 15.06.2017

Н. Н. Цыбулько¹, А. В. Шашко²¹*Институт почвоведения и агрохимии, Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь*²*Институт радиологии, Гомель, Беларусь***ПОСТУПЛЕНИЕ ¹³⁷Cs В ЗЕРНО ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ ПРИ РАЗНЫХ УРОВНЯХ АЗОТНОГО И КАЛИЙНОГО ПИТАНИЯ НА АНТРОПОГЕННО-ПРЕОБРАЗОВАННОЙ ТОРФЯНОЙ ПОЧВЕ**

Аннотация: На территории Республики Беларусь в составе загрязненных радионуклидами сельскохозяйственных земель значительные площади занимают антропогенно-преобразованные торфяные почвы. За последние годы проведен целый ряд исследований, в которых изучены диагностические признаки, свойства и плодородие, режимы минерального питания растений на этих почвах. Однако исследования по миграции радионуклидов, влиянию различных агроприемов на поступление их в продукцию сельскохозяйственных культур не проводились. В статье изучено поступление ¹³⁷Cs в зерно яровой пшеницы в зависимости от уровней азотного и калийного питания растений при внесении разных доз азотных и калийных удобрений на антропогенно-преобразованной торфяной почве. Установлено, что применение N₁₂₀P₆₀K₁₂₀ уменьшает содержание ¹³⁷Cs в зерне по отношению к контролю на 15–22 %, а при совместном применении минеральных удобрений, медьсодержащего удобрения и регулятора роста растений – на 34 %. Минимальное накопление ¹³⁷Cs яровой пшеницей отмечается при азотно-калийном соотношении 1:(1,0–1,2). При соотношении 1:(0,2–0,6) наблюдается дефицит азота и увеличение концентрации радионуклида в зерне из-за снижения урожайности. Увеличение накопления радионуклида в зерне наблюдается при соотношении выше 1:1,5. Результаты исследований позволяют определить допустимые плотности загрязнения антропогенно-преобразованной торфяной почвы ¹³⁷Cs и оптимальные дозы минеральных удобрений при возделывании яровой пшеницы на пищевые и фуражные цели.

Ключевые слова: ¹³⁷Cs, удельная активность, коэффициент перехода, антропогенно-преобразованная торфяная почва, удобрения, калий, азот, уровни, соотношения, яровая пшеница

Для цитирования: Цыбулько, Н. Н. Поступление ¹³⁷Cs в зерно яровой пшеницы при разных уровнях азотного и калийного питания на антропогенно-преобразованной торфяной почве / Н. Н. Цыбулько, А. В. Шашко // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2018. – Т. 56, № 2. – С. 164–174. DOI: 10.29 235/1817-7204-2018-56-2-164-174

N. N. Tsybulka¹, A. V. Shashko²¹*Institute of Soil Science and Agrochemistry, the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*²*Institute of Radiology, Gomel, Belarus***ACCUMULATION OF ¹³⁷CS IN SPRING WHEAT GRAIN AT DIFFERENT LEVELS OF NITROGEN AND POTASSIUM NUTRITION IN ANTHROPOGENIC-TRANSFORMED PEAT SOIL**

Abstract: Anthropogenic-transformed peat soils occupy significant areas in the territory of the Republic of Belarus in composition of agricultural land contaminated with radionuclides. A number of studies have been carried out in recent years where diagnostic features, properties and fertility, regimes of mineral nutrition of plants on these soils have been studied. However, studies on radionuclides migration, impact of various agricultural practices on penetration into agricultural crops have not been carried out. The article dwells on study of ¹³⁷Cs penetration into spring wheat grain depending on the levels of nitrogen and potassium nutrition of plants when various rates of nitrogen and potassium fertilizers were applied on anthropogenic-transformed peat soil. It has been determined that N₁₂₀P₆₀K₁₂₀ application reduces ¹³⁷Cs level in grain by 15–22 % com-

pared to the control, and when combined with mineral fertilizers, copper-containing fertilizer and plant growth regulator – by 34 %. The minimum accumulation of ^{137}Cs in spring wheat is determined at nitrogen-potassium ratio of 1:(1.0–1.2). At the ratio of 1:(0.2–0.6) nitrogen deficiency and increase in radionuclide concentration in grain are observed due to yield decrease. Increase in accumulation of radionuclide in grain is observed at the ratio above 1:1.5. The results of researches make it possible to determine the allowable contamination density values of the anthropogenic-transformed peat soil with ^{137}Cs and optimal doses of mineral fertilizers for cultivation of food and forage purpose spring wheat.

Keywords: ^{137}Cs , specific activity, transfer ration, anthropogenic-transformed peat soil, fertilizers, potassium, nitrogen, spring wheat

For citation: Tsybulka N. N., Shashko A. V. Accumulation of ^{137}Cs in spring wheat grain at different levels of nitrogen and potassium nutrition in anthropogenic-transformed peat soil. *Vesti Natsyonal'nyay akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2018, vol. 56, no 2, pp. 164–174 (in Russian). DOI: 10.29 235/1817-7204-2018-56-2-164-174

Генетические особенности почв оказывают существенное влияние на процессы сорбции радионуклидов и интенсивность перехода их в растения. В зависимости от свойств почв содержание обменной формы радионуклидов для ^{137}Cs варьирует от 9 до 40 %, для ^{90}Sr – от 64 до 93 % [1–5]. По обобщенным многолетним данным, полученным в разных странах, накопление ^{137}Cs и ^{90}Sr в зерне злаковых культур на песчаных почвах выше, чем на суглинистых, в среднем в 1,5 раза [6].

В научной литературе имеются противоречивые данные по влиянию гидроморфизма почвы на миграцию радионуклидов в системе «почва–растение». Наблюдается как повышение перехода их в растения с увеличением содержания влаги в почве, так и отсутствие влияния. Отмечается также, что коэффициенты накопления радионуклидов практически не меняются от гидроморфизма почвы, однако может возрастать общий вынос их за счет увеличения биомассы растений [7–9]. Влияние гидроморфизма почвы на биологическую доступность радионуклидов связывают с формами нахождения их в почве и прочностью связи с минеральными и органическими коллоидами [10, 11].

Установлены высокие параметры поступления радионуклидов в растения на торфяно-болотных почвах, что связано с их высокой емкостью катионного обмена при низком поверхностном заряде. Это приводит к адсорбции значительных количеств веществ в формах, доступных растениям. Важную роль здесь играют также гумусовые кислоты [12].

На территории радиоактивного загрязнения Республики Беларусь в составе сельскохозяйственных земель торфяно-болотные почвы занимают значительный удельный вес. Вследствие длительного и интенсивного сельскохозяйственного использования возникла проблема трансформации агроландшафтов с органогенными торфяно-болотными почвами. В структуре почвенного покрова мелиорированных земель появились новые разновидности торфяных почв с уменьшающимся содержанием органического вещества. В результате эти земли стали представлять собой сложные почвенные комбинации, различающиеся водно-воздушным режимом, содержанием органического вещества и другими свойствами [13, 14]. На месте торфяно-болотных почв образовались антропогенно-преобразованные торфяные почвы, включающие деградированные торфяно-минеральные, минеральные остаточно-торфяные и минеральные постторфяные почвы, которые согласно классификации отнесены к дегроторфяным разной степени минерализации [15]. В настоящее время площади антропогенно-преобразованных торфяных почв составляют около 200 тыс. га, в том числе в наиболее загрязненных районах Брестской, Гомельской и Могилевской областей – около 100 тыс. га, и в перспективе могут достигнуть 350 тыс. га и более [16]. По уровню содержания органического вещества, водно-физическим и агрохимическим свойствам эти почвы значительно отличаются как от торфяных, так и от минеральных почв [17].

За последние годы проведен целый ряд исследований, в которых изучались диагностические признаки, свойства и плодородие антропогенно-преобразованных торфяных почв, режимы минерального питания сельскохозяйственных культур на этих почвах [18, 19]. Однако отсутствуют работы по исследованию поведения радионуклидов и поступления их в растения на данных почвах.

Наблюдается тенденция увеличения площадей деградированных торфяных почв, что требует более углубленного и масштабного изучения влияния их плодородия на количественные параметры перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в сельскохозяйственные культуры, способов и приемов применения удобрений на этих почвах для разработки рекомендаций по их эффективному использованию и снижению накопления радионуклидов в продукции.

Основным агрохимическим приемом, снижающим поступление ^{137}Cs в сельскохозяйственные культуры, является внесение калийных удобрений. На почвах разного генезиса под влиянием калия поступление ^{137}Cs в сельскохозяйственные культуры может уменьшаться от 2 до 20 раз [20–22]. Положительная роль его в снижении поступления радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию возрастает на фоне оптимальных параметров минерального питания растений [23].

Снижение перехода радионуклидов в растения при внесении калийных удобрений существенно зависит от исходной обеспеченности почвы подвижным калием [24]. Установлено, что уровень содержания подвижного калия в почве, превышение которого не снижает накопление ^{137}Cs в полевых культурах, составляет 240–260 мг/кг почвы. Внесение высоких доз калийных удобрений (180–240 кг/га) на слабообеспеченных почвах (150 мг/кг почвы) снижает в 1,5–2,7 раза содержание ^{137}Cs . На почвах с повышенным (250 мг/кг почвы) и высоким (350 мг/кг почвы) содержанием подвижного калия внесение повышенных доз калийных удобрений малоэффективно [25].

В отличие от калия азотные удобрения, особенно в повышенных дозах, увеличивают в 1,5–4,0 раза накопление радионуклидов в сельскохозяйственных культурах [26]. Принято считать, что основной причиной высокого перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в растения при внесении азотных удобрений является возможное подкисление почвенного раствора, в результате этого наблюдается повышение подвижности в почве элементов питания, в том числе и радионуклидов.

Усиление поглощения ^{137}Cs при внесении азотных удобрений объясняется повышением количества подвижного радионуклида в почве под влиянием гидратированных ионов аммония, имеющих с радиоцезием сходный по величине ионный радиус и способных вытеснить его из мест сорбции в почвенный раствор [23]. Однако нитратная форма азота также усиливает поглощение ^{137}Cs , хотя и в меньшей степени (в среднем в 2 раза), чем азот в аммонийной форме [27]. Предполагается, что повышенное накопление ^{137}Cs в растениях при внесении азота может происходить в результате сдвига в соотношениях элементов в почвенном растворе [28].

Действие азотных удобрений на миграцию радионуклидов в системе «почва – растение» зависит от соотношения азота и калия, что подтверждается исследованиями, проведенными на территории радиоактивного загрязнения России. В полевых опытах на дерново-подзолистых песчаных почвах установлено, что увеличение аккумуляции ^{137}Cs в растениях от азотных удобрений наблюдается при сужении соотношения доступных растениям азота и калия в почве ниже (1:3)–(1:4). Внесение калийных удобрений в более высоких дозах, чем азотных, способствует снижению загрязнения продукции. При расширении N:K более (1:3)–(1:4) существенно уменьшения накопления растениями ^{137}Cs не происходило [29].

Цель настоящей работы – изучение поступления ^{137}Cs в зерно яровой пшеницы в зависимости от уровней и соотношений азотного и калийного питания растений при внесении разных доз азотных и калийных удобрений на антропогенно-преобразованной торфяной почве.

Материалы и методы исследований. Исследования проводили в стационарном полевом опыте на территории землепользования Государственного предприятия «Новое Полесье» Лунинецкого района Брестской области в 2012–2014 гг. Объектом исследования являлась торфяно-минеральные почвы. Агрохимические показатели пахотного (0–25 см) слоя почвы следующие (средние значения): органическое вещество – 60,4 %, общий азот – 1,71 %, минеральный азот – 112,8 мг/кг почвы (95 кг/га), pH_{KCl} – 5,44, подвижные формы (в 0,2 М HCl) P_2O_5 – 748 мг/кг почвы (620 кг/га) и K_2O – 625 мг/кг почвы (520 кг/га). Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs колебалась от 137 до 167 кБк/м² и в среднем составляла 148 кБк/м².

Возделывали яровую пшеницу сорта Ростань. Фосфорные и калийные удобрения вносили перед посевом, азотные удобрения перед посевом и в подкормку в фазу выхода в трубку растений. Схема опыта приведена в табл. 1.

Размещение делянок в опыте рендомизированное. Повторность вариантов в опыте четырехкратная. Общая площадь делянки составляла 29 м², учетная площадь – 24 м².

Агрохимические показатели почв определяли по следующим методикам: органическое вещество – по Тюрину в модификации ЦИНАО по ГОСТ 26212–91; pH_{KCl} – потенциометрическим методом по ГОСТ 26483–85; подвижные формы фосфора и калия – ГОСТ 26207–91; общий азот – ГОСТ 26107–84; N-NH_4 – ГОСТ 26489–85; N-NO_3 – по ГОСТ 26488–85.

Отбор проб почвы, подготовку почвенных и растительных проб для определения содержания ^{137}Cs проводили по методикам¹. Удельную активность ^{137}Cs (Бк/кг) в почвенных пробах определяли на γ - β -спектрометре МКС-АТ1315, в растительных образцах – на γ -спектрометрическом комплексе Canberra-Packard. Основная относительная погрешность измерений при доверительном интервале $P = 95\%$ не превышала 15–30 %. Аппаратурная ошибка измерений не превышала 15 %. Для оценки поступления ^{137}Cs из почвы в растения рассчитывали коэффициент перехода (K_p) – отношение удельной активности радионуклида в растениях к плотности загрязнения почвы на единицу площади (Бк/кг:кБк/м²).

Полученные данные обрабатывали методами корреляционно-регрессионного анализа с использованием компьютерного программного обеспечения (Excel 7.0, Statistic 7.0).

Результаты и их обсуждение. В наших исследованиях при плотности загрязнения почвы ^{137}Cs до 5 Ки/км² удельная активность радионуклида в зерне яровой пшеницы даже в варианте без применения удобрений (контроль) не превышала 20 Бк/кг и составила в среднем в 2012 г. 6,67 Бк/кг, в 2013 г. – 18,15 и в 2014 г. – 16,23 Бк/кг. Различия в содержании ^{137}Cs по годам составляли 2,7 раза (табл. 2). Более низкие значения отмечались во влажные годы. По степени увлажнения 2012 и 2014 гг. характеризовались как влажные – ГТК составили 1,66 и 2,02 соответственно, а 2013 г. был слабозасушливым – ГТК равен 1,16.

Т а б л и ц а 2. Влияние доз азотных и калийных удобрений на содержание ^{137}Cs в зерне яровой пшеницы, Бк/кг

Table 2. Effect of doses of nitrogen and potassium fertilizers on ^{137}Cs level in spring wheat grain, Bq/kg

Вариант опыта	2012 г.	2013 г.	2014 г.	Среднее значение	Процент к контролю
1. Контроль	6,67±1,99	18,15±5,44	16,23±4,87	13,68	100
2. P ₆₀ K ₈₀	5,72±1,72	14,60±4,38	14,22±4,34	11,51	86
3. P ₆₀ K ₁₂₀	4,67±1,38	14,07±4,22	12,54±3,76	10,43	76
4. P ₆₀ K ₁₆₀	5,21±1,56	14,20±4,24	11,32±3,39	10,24	75
5. N ₆₀ P ₆₀ K ₁₂₀	8,40±2,52	13,10±3,86	10,58±3,15	10,69	78
6. N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀	9,23±3,01	14,10±4,22	10,58±3,10	11,30	83
7. N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₂₀	11,42±3,49	14,61±4,53	8,90±2,71	11,64	85
8. N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₂₀ + Cu ₂₀₀ + PP	7,89±2,47	12,09±3,27	7,05±2,07	9,01	66

Применение фосфорных и калийных удобрений в дозах P₆₀K₈₀ при содержании в почве P₂O₅ 748 и K₂O 625 мг/кг почвы снижало накопление ^{137}Cs в зерне по отношению к контролю от 12 до 20 % в зависимости от года, а в среднем на 14 %. Дальнейшее повышение доз калия было менее эффективным. Активность ^{137}Cs в зерне при увеличении дозы в 1,5 раза (K₁₂₀) уменьшилась в среднем на 24 % к контролю и на 8 % к варианту с K₈₀. Удвоение дозы калийных удобрений (K₁₆₀) практически не способствовало снижению содержания радионуклида в продукции по отношению к варианту P₆₀K₁₂₀.

¹ Почвы. Отбор проб : ГОСТ 28168–89. – Введ. 01.04.90. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 6 с.; Радиационный контроль. Отбор проб сельскохозяйственного сырья и кормов. Общие требования : СТБ 1056–98. – Введ. 01.07.1998. – Минск : Белстандарт, 1998. – 7 с.; Радиационный контроль. Подготовка проб для определения стронция-90 радиохи-мическими методами : СТБ 1059–98. – Введ. 01.07.1998. – Минск : Гос. ком. по стандартизации Респ. Беларусь. – 28 с.

Т а б л и ц а 1. Схема применения удобрений в опыте

Table 1. Fertilizers application scheme in experiment

Вариант опыта	Сроки и дозы внесения азот-ных удобрений, кг/га		Соотношение азота и калия (N:K)
	перед посевом	в фазу выхода в трубку растений	
1. Контроль (без удобрений)	–	–	0,1
2. P ₆₀ K ₈₀	–	–	1,2
3. P ₆₀ K ₁₂₀	–	–	0,8
4. P ₆₀ K ₁₆₀	–	–	0,6
5. N ₆₀ P ₆₀ K ₁₂₀	60	–	1,3
6. N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀	60	30	1,5
7. N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₂₀	60	60	1,8
8. N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₂₀ + Cu ₂₀₀ + PP	90	30	1,8

Влияние азотных удобрений на поступление ^{137}Cs в растения зависело от доз их внесения и метеорологических условий вегетационного периода в годы исследований. В условиях влажного вегетационного периода 2012 г. применение перед посевом яровой пшеницы 60 кг/га действующего вещества азотных удобрений (вар. 3) способствовало увеличению удельной активности ^{137}Cs в зерне в 1,8 раза по отношению к фону $\text{P}_{60}\text{K}_{120}$. Азотная подкормка в фазу выхода в трубку растений в дозе N_{30} (вар. 4) не привела к существенному повышению накопления радионуклида в продукции по сравнению с предпосевным внесением N_{60} , тогда как более высокая доза азота (N_{60}) в эту фазу увеличила содержание ^{137}Cs в зерне в 1,4 раза.

При совместном применении N_{120} дробно (N_{90} перед посевом и N_{30} в фазу выхода в трубку растений), медьсодержащего удобрения (Cu_{200}) и регулятора роста растений наблюдалось некоторое снижение поступления ^{137}Cs в растения по отношению к вариантам с внесением только азотных удобрений.

В условиях слабо засушливого вегетационного периода 2013 г. отмечалось более высокое накопление ^{137}Cs яровой пшеницей по сравнению с влажным 2012 г. На контроле и на фосфорно-калийном фоне это превышение составляло 2,7–3,0 раза, а в вариантах с азотными удобрениями – 1,3–1,5 раза. Различия в содержании радионуклида в зерне между фоном $\text{P}_{60}\text{K}_{120}$ и вариантами с разными дозами азота были незначительные. Удельная активность ^{137}Cs изменялась в пределах 13,10–14,61 Бк/кг. Минимальное накопление радионуклида (в среднем 12,09 Бк/кг) наблюдалось при совместном применении азотных и медьсодержащего удобрения и регулятора роста растений.

В 2014 г. (влажные условия вегетационного периода) азотные удобрения способствовали снижению накопления ^{137}Cs в зерне яровой пшеницы по отношению к фосфорно-калийному фону. Минимальное содержание радионуклида отмечалось в вариантах с внесением N_{120} и при совместном внесении N_{120} , медьсодержащего удобрения и регулятора роста растений, которое составило 8,90 и 7,05 Бк/кг соответственно.

Таким образом, в 2013 и 2014 гг. азотные удобрения даже в повышенных дозах (N_{120}) не оказали существенного влияния на увеличение поступления ^{137}Cs в зерно яровой пшеницы. При содержании радионуклида на фосфорно-калийном фоне в среднем за три года 10,43 Бк/кг активность его в вариантах с разными дозами и сроками внесения азотных удобрений колебалась в пределах 10,69–11,64 Бк/кг. Применение полного минерального удобрения (НПК) способствовало снижению накопления ^{137}Cs яровой пшеницей по отношению к контролю (без удобрений) на 15–22 %, а при совместном применении минеральных удобрений, медьсодержащего удобрения и регулятора роста растений – на 34 %.

Расчеты коэффициентов перехода ^{137}Cs из почвы в зерно яровой пшеницы показали, что за годы исследований в зависимости от метеорологических условий вегетационных периодов различия в переходе ^{137}Cs в зерно составили 1,5–1,8 раза. На контрольном варианте коэффициент перехода варьировал по годам от 0,064 до 0,113 Бк/кг:кБк/м², а в среднем был равен 0,088 Бк/кг:кБк/м². В варианте с внесением фосфорных и калийных удобрений в дозах 60 и 80 кг/га соответственно он снизился по отношению к контролю в среднем на 14 %, величина его изменялась по годам от 0,058 до 0,086 при среднем значении 0,076 Бк/кг:кБк/м². При внесении K_{120} и K_{160} переход радионуклида уменьшился по отношению к контрольному варианту на 24 и 25 % соответственно и составил в среднем за три года исследований 0,067 и 0,066 Бк/кг:кБк/м² (рис. 1).

Азотные удобрения, вносимые в дозах 60, 90 и 120 кг/га, на фоне $\text{P}_{60}\text{K}_{120}$ не привели к повышению коэффициентов перехода радионуклида в зерно и изменялись в среднем за три года опытов в пределах 0,064–0,069, т.е. были на уровне фона $\text{P}_{60}\text{K}_{120}$. Кроме того, дополнительные обработки посевов медьсодержащим удобрением и регуляторами роста растений значительно снижали величину этого показателя.

Изучено влияние соотношения азотного и калийного питания растений на накопление ^{137}Cs яровой пшеницей. Содержание доступного растениям азота рассчитывали как сумму минерального азота (азот нитратов, обменного аммония) в пахотном слое почвы и азота удобрений. Уровень калийного питания определяли без внесения калийных удобрений и при внесении их в дозах от 80 до 160 кг/га с интервалом в 40 кг/га действующего вещества. При определении соотношения азота к калию (N:K) за единицу принимали калий. Данное соотношение изменялось в интервале 1:(0,1–1,8).

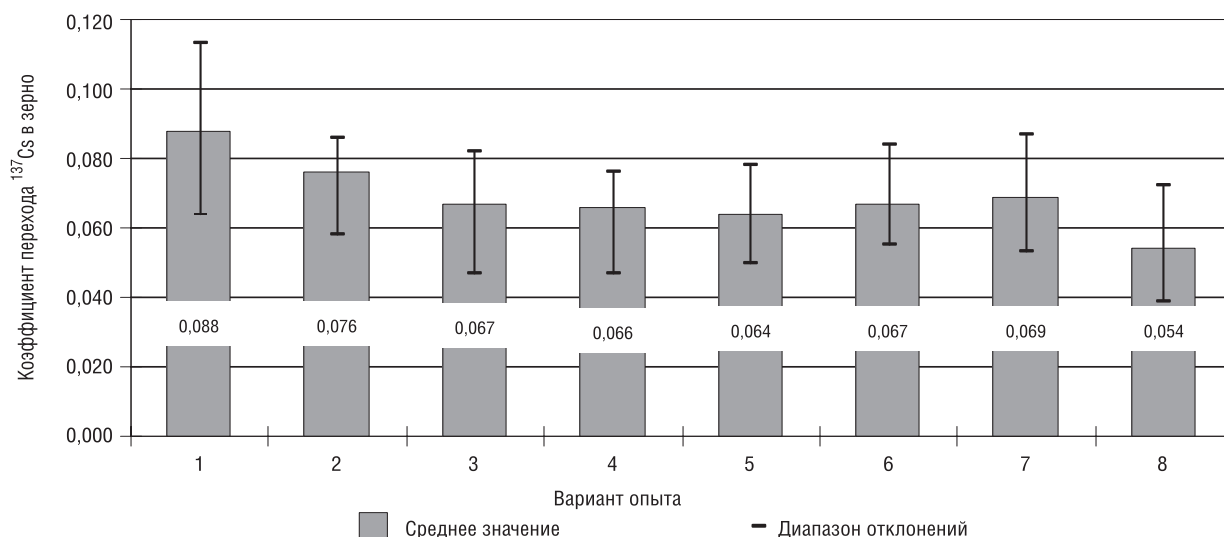


Рис. 1. Коефициенты перехода ^{137}Cs в зерно яровой пшеницы в зависимости от доз азотных и калийных удобрений, Бк/кг:кБк/м²

Fig. 1. Ratios of ^{137}Cs transition into spring wheat grain depending on doses of nitrogen and potassium fertilizers, Bq/kg:kBq/m²

Проведен корреляционно-регрессионный анализ данных соотношения N:K и накопления ^{137}Cs яровой пшеницей. Установлены тесные взаимосвязи соотношения азота и калия в питании растений с удельной активностью ^{137}Cs в зерне ($R=0,85$) и коэффициентами перехода ^{137}Cs в зерно ($R=0,79$). Корреляционные зависимости между анализируемыми показателями описывали квадратичными уравнениями с полиномиальной линией тренда (рис. 2).

Минимальное поступление радионуклида в зерно наблюдалось при азотно-калийном соотношении в диапазоне 1:(1,0–1,2). При более узком соотношении (1:(0,2–0,6)) и, следовательно, дефиците в азоте наблюдалось увеличение концентрации ^{137}Cs в зерне в результате снижения урожайности яровой пшеницы. Внесение повышенных доз азотных удобрений на низком фоне калийного питания расширяло соотношение азота к калию, что сопровождалось образованием калийного дефицита и ослаблением дискриминации ^{137}Cs по отношению к калию при поступлении его из почвы в растения. Увеличение накопления радионуклида в зерне наблюдалось при расширении соотношения азота к калию выше 1:1,5.

Следовательно, как показывают результаты исследований, увеличение накопления ^{137}Cs в растениях при внесении азотных удобрений определяется не только повышением их доз, но также зависит от уровня применения калийных удобрений, т.е. от сбалансированности азотного и калийного питания растений.

С целью оптимизации размещения сельскохозяйственных культур по полям и рабочим участкам на загрязненных радионуклидами землях проводится оценка их радиологической пригодности на основе определения предельно допустимой плотности загрязнения почвы ^{137}Cs или ^{90}Sr . На основании коэффициентов перехода ^{137}Cs в зерно яровой пшеницы, полученных на разных уровнях применения минеральных удобрений, определены допустимые плотности загрязнения почвы (ДП_п) при возделывании ее для получения зерна на пищевые и фуражные цели, отвечающего республиканским допустимым уровням (РДУ) и допустимым уровням, принятым в рамках Таможенного союза (ДУ ТС). Расчеты проводились по следующей формуле:

$$\text{ДП}_\text{п} = \frac{\text{ДУ}}{K_\text{п} \cdot 37},$$

где ДП_п – допустимая плотность загрязнения почвы радионуклидом, Ки/км²; ДУ, РДУ – допустимый уровень в рамках Таможенного союза и республиканский допустимый уровень содержания радионуклида в продукции соответственно, Бк/кг, л; $K_\text{п}$ – коэффициент перехода радионуклида из почвы в растениеводческую продукцию, Бк/кг:кБк/м²; 37 – коэффициент пересчета нКи/кг в Бк/кг.

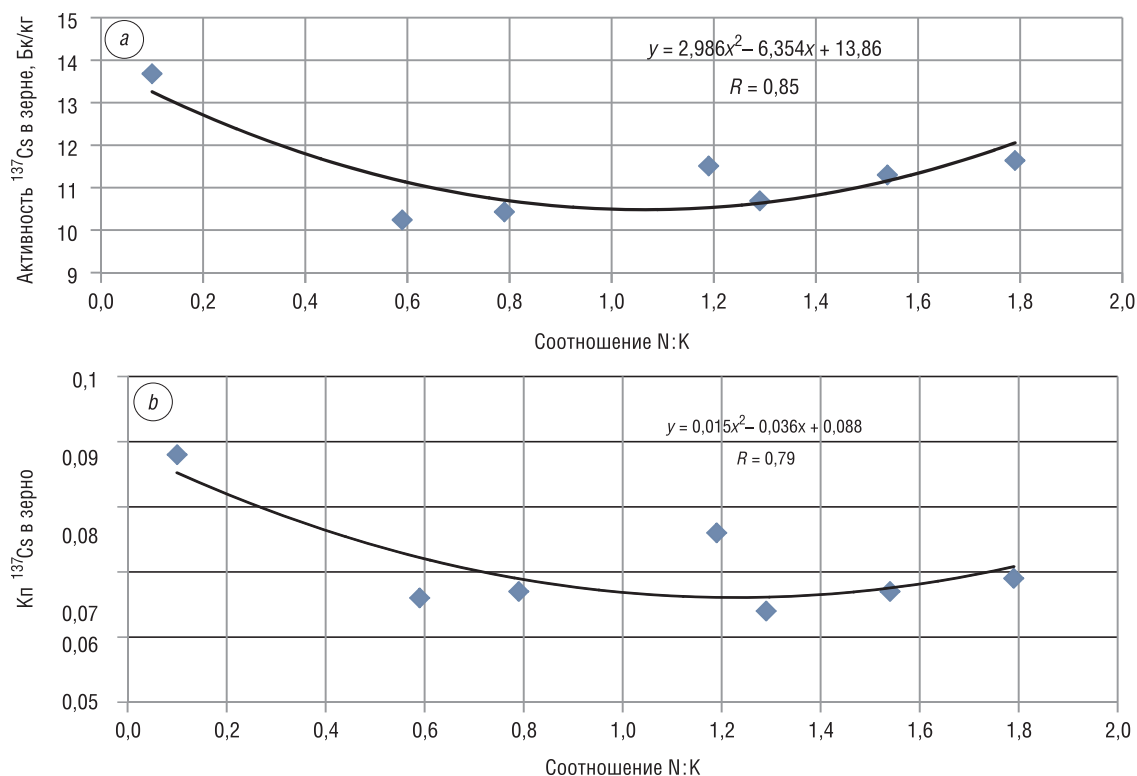


Рис. 2. Взаимосвязи соотношения N:K с активностью ¹³⁷Cs в зерне (a) и коэффициентами перехода ¹³⁷Cs в зерно яровой пшеницы (b)

Fig. 2. Correlation of N:K ratio with ¹³⁷Cs activity in grain (a) and ratios of ¹³⁷Cs transition into grain (b) of spring wheat

При прогнозе допустимой плотности загрязнения почв учитывали определенную степень консервативности (прочности прогноза), предусматривающую изменения коэффициентов перехода радионуклидов в растениеводческую продукцию, связанных с особенностями гидротермических условий вегетационных периодов, колебания которых оцениваются в $\pm 30\%$. В наших оценках допустимая плотность загрязнения почв ¹³⁷Cs, где возможно производство продукции изучаемых культур в пределах РДУ или ДУ ТС, принималась на уровне 70 % от расчетной величины.

В условиях радиоактивного загрязнения земель наиболее жестко нормируются по содержанию радионуклидов продовольственные сельскохозяйственные культуры: зерновые (озимая рожь, озимая пшеница ячмень, яровая пшеница, овес), зернобобовые (горох), картофель. В соответствии с РДУ, содержание ¹³⁷Cs в зерне на пищевые цели не должно превышать 90 Бк/кг, а в зерне на детское питание – 55 Бк/кг². Согласно Техническому регламенту Таможенного союза (ТР ТС 015/2011) «О безопасности зерна», допустимый уровень ¹³⁷Cs в зерне на пищевые цели составляет 60 Бк/кг.

Менее «жесткие» нормативы установлены на содержание ¹³⁷Cs в зерне фуражном. При получении нормативно чистого цельного молока (¹³⁷Cs < 100 Бк/л) РДУ радионуклида в зернофураже составляет 150 Бк/кг, при получении нормативно чистого мяса (¹³⁷Cs < 500 Бк/л) на заключительной стадии откорма – 480 Бк/кг. Техническим регламентом (ТР ТС 021/2011) «О безопасности пищевой продукции» в рамках Таможенного союза принят норматив на содержание ¹³⁷Cs в мясе 200 Бк/кг³.

Установлено, что на торфяно-минеральной почве с содержанием подвижных форм фосфора и калия 748 и 625 мг/кг почвы соответственно и применении минеральных удобрений яровую пшеницу можно возделывать без ограничений по плотности загрязнения ¹³⁷Cs для производства фуражного зерна при использовании его для получения цельного молока и мяса, отвечающим нормативным требованиям по содержанию радионуклида (табл. 3).

² Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в пищевых продуктах и питьевой воде (РДУ-99) : ГН 10-117-99 : утв. постановлением Гл. гос. санитар. врача Респ. Беларусь 26 апр. 1999 г., № 16 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 1999. – № 38. – 8/309.

³ О безопасности пищевой продукции: технический регламент Таможенного союза : ТР ТС 021/2011 : принят 09.12.2011 : вступ. в силу 01.07.2013 / Евраз. экон. комис. – Минск : Госстандарт, 2012. – 196 с.

Т а б л и ц а 3. Допустимые плотности загрязнения ^{137}Cs торфяно-минеральной почвы при производстве зерна яровой пшеницы в зависимости от его целевого назначенияTable 3. Allowable contamination density of ^{137}Cs in peat-mineral soil at production of spring wheat grain depending on its intended use

Вариант опыта	Зерно на пищевые цели			Зерно на фуражные цели		
	РДУ-99, 55 Бк/кг	РДУ-99, 90 Бк/кг	ТР ТС, 60 Бк/кг	РДУ-99 для молока (100 Бк/л)	РДУ-99 для мяса (500 Бк/кг)	ТР ТС для мяса (200 Бк/кг)
1. Контроль	13,0	21,3	14,2	35,6	40,0	40,0
2. $\text{P}_{60}\text{K}_{80}$	15,0	24,6	16,4	40,0	40,0	40,0
3. $\text{P}_{60}\text{K}_{120}$	17,1	28,0	18,6	40,0	40,0	40,0
4. $\text{P}_{60}\text{K}_{160}$	17,3	28,3	18,9	40,0	40,0	40,0
5. $\text{N}_{60}\text{P}_{60}\text{K}_{120}$	17,9	29,3	19,5	40,0	40,0	40,0
6. $\text{N}_{90}\text{P}_{60}\text{K}_{120}$	17,1	28,0	18,6	40,0	40,0	40,0
7. $\text{N}_{120}\text{P}_{60}\text{K}_{120}$	16,5	27,0	18,0	40,0	40,0	40,0
8. $\text{N}_{120}\text{P}_{60}\text{K}_{120} + \text{Cu}_{200} + \text{PP}$	21,2	34,7	23,2	40,0	40,0	40,0

Более жесткие ограничения установлены в отношении размещения яровой пшеницы на торфяно-минеральных почвах при возделывании ее для получения зерна на детское питание и зерна на пищевые цели с допустимым содержанием ^{137}Cs , принятом в Таможенном союзе. Получить продовольственное зерно с содержанием радионуклида до 60 Бк/кг возможно при плотности загрязнения почвы до 19,5 Ки/км² и применении невысоких доз азотных удобрений ($\text{N}_{60}\text{P}_{60}\text{K}_{120}$), при внесении повышенных доз (N_{120}) – при плотности загрязнения до 18 Ки/км².

В то же время совместное применение азотных удобрений в дозе 120 кг/га, медьсодержащих удобрений и регуляторов роста растений позволяет получать зерно на пищевые цели с содержанием ^{137}Cs менее 55–60 Бк/кг при возделывании пшеницы на почвах с плотностью загрязнения до 21,0–23,0 Ки/км².

Выводы

1. Фосфорные и калийные удобрения в дозах $\text{P}_{60}\text{K}_{80}$ при содержании в антропогенно-преобразованной торфяной почве P_2O_5 748 и K_2O 625 мг/кг почвы снижали накопление ^{137}Cs в зерне яровой пшеницы по отношению к контролю на 12–20 % в зависимости от года, в среднем на 14 %. Дальнейшее повышение доз калия было менее эффективным. Применение полного минерального удобрения ($\text{N}_{120}\text{P}_{60}\text{K}_{120}$) уменьшало содержание радионуклида в зерне по отношению к контролю на 15–22 %, а при совместном применении минеральных удобрений, медьсодержащего удобрения и регулятора роста растений – на 34 %.

2. На антропогенно-преобразованной торфяной почве минимальное накопление ^{137}Cs яровой пшеницей отмечается при азотно-калийном соотношении 1:(1,0–1,2). При соотношении 1:(0,2–0,6) наблюдается дефицит азота и увеличение концентрации радионуклида в зерне из-за снижения урожайности. Внесение повышенных доз азотных удобрений на низком фоне калийного питания расширяет соотношение N:K, что сопровождается образованием калийного дефицита и ослаблением дискриминации ^{137}Cs по отношению к калию при поступлении в растения. Увеличение накопления радионуклида в зерне наблюдается при соотношении выше 1:1,5.

3. На антропогенно-преобразованной торфяной почве яровую пшеницу можно возделывать без ограничений по плотности загрязнения ^{137}Cs для производства фуражного зерна при использовании его для получения цельного молока и мяса. Размещать культуру для производства зерна на пищевые цели с содержанием ^{137}Cs до 60 Бк/кг возможно при плотности загрязнения почвы до 19,5 Ки/км² и внесении невысоких доз азотных удобрений (N_{60}), а на фоне повышенных доз (N_{120}) – при плотности загрязнения до 18 Ки/км². Совместное применение азотных удобрений в дозе 120 кг/га, медьсодержащих удобрений и регуляторов роста растений позволяет получать зерно на пищевые цели с содержанием ^{137}Cs менее 55–60 Бк/кг при возделывании пшеницы на почвах с плотностью загрязнения до 21,0–23,0 Ки/км².

Список использованных источников

1. Сысоева, А. А. Экспериментальное исследование и моделирование процессов, определяющих подвижность ^{90}Sr и ^{137}Cs в системе почва – растение : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.00.01 / А. А. Сысоева ; Всерос. науч.-исслед. ин-т с.-х. радиологии и агроэкологии Рос. акад. с.-х. наук. – Обнинск, 2004. – 29 с.
2. Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. Радиэкология после Чернобыля / Л. Дж. Апплби [и др.] ; под ред. Ф. Уорнера, Р. Харрисона ; пер. с англ. Д. В. Гричука [и др.]. – М. : Мир, 1999. – 511 с.
3. Моисеев, И. Т. Изучение поведения ^{137}Cs в почвах и его поступления в сельскохозяйственные культуры в зависимости от различных факторов / И. Т. Моисеев, Г. И. Агапкина, Л. А. Рерих // Агрохимия. – 1994. – № 2. – С. 103–118.
4. Шмигельская, И. Д. Накопление радионуклидов растениями в зависимости от направленности процессов почвообразования и степени гидроморфизма / И. Д. Шмигельская, В. Ю. Агеев // Почвы, их эволюция, охрана и повышение производительной способности в современных социально-экономических условиях : материалы I съезда Белорус. о-ва почвоведов / Акад. аграр. наук Респ. Беларусь, Белорус. науч.-исслед. ин-т почвоведения и агрохимии, Ин-т леса ; редкол.: И. М. Богдевич [и др.]. – Минск ; Гомель, 1995. – С. 272.
5. Шмигельская, И. Д. Загрязнение многолетних злаковых трав цезием-137 и стронцием-90 в зависимости от типов и свойств почв / И. Д. Шмигельская, И. А. Ефимова, Т. В. Арастович // Почвенные исследования и применение удобрений : междомств. темат. сб. / Белорус. науч.-исслед. ин-т почвоведения и агрохимии. – Минск, 2001. – Вып. 26. – С. 270–288.
6. Nisbet, A. F. Soil-to-plant transfer factors for radiocaesium and radiostrontium in agricultural systems / A. F. Nisbet, R. F. Woodman // Health Physics. – 2000. – Vol. 78, N3. – P. 279–288. DOI: 10.1097/00004032-200003000-00005
7. Гулякин, И. В. Влияние влажности почвы на поступление стронция-90 и цезия-137 в растения / И. В. Гулякин, Е. В. Юдинцева, Э. М. Левина // Агрохимия. – 1976. – № 2. – С. 102–107.
8. Моисеев, И. Т. О влиянии влажности почв на поступление ^{137}Cs в сельскохозяйственные растения / И. Т. Моисеев, Ф. А. Тихомиров, Л. А. Рерих // Агрохимия. – 1974. – № 7. – С. 124–127.
9. Касьянчик, С. А. Зависимость перехода Cs-137 в травы пойменных лугов от природных и регулируемых факторов / С. А. Касьянчик, А. М. Котович // Фундаментальные и прикладные аспекты радиобиологии: биологические эффекты малых доз и радиоактивное загрязнение среды (радиозэкологические и медико-биологические последствия катастрофы на ЧАЭС) : тез. докл. Междунар. науч. конф., Минск, 16–17 апр. 1998 г. / Ин-т радиобиологии Нац. акад. наук Беларуси, Мед. радиол. науч. центр Рос. акад. мед. наук ; редкол.: Е. Ф. Конопля [и др.]. – Минск, 1998. – С. 108.
10. Рерих, Л. А. Влияние свойств почвы на трансформацию форм ^{137}Cs и поступление его в сельскохозяйственные растения / Л. А. Рерих, И. Т. Моисеев // Агрохимия. – 1989. – № 8. – С. 96–100.
11. Динамика вертикальной миграции чернобыльских радионуклидов в почвенном покрове / Е. П. Петряев [и др.] // Геохимические пути миграции искусственных радионуклидов в биосфере : тез. докл. V конф., г. Пушкино, дек. 1991 г. / АН СССР, Ин-т геохимии и аналит. химии им. В. И. Вернадского, Науч. совет «Радиогеохимия Чернобыля» при ГЕОХИ АН СССР ; редкол.: Л. М. Хитров (отв. ред.) [и др.]. – Пушкино, 1991. – С. 25.
12. Соколик, Г. А. Действие фульво- и гуминовых кислот на механизмы накопления радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr растительными клетками / Г. А. Соколик // Радиэкология торфяных почв : материалы Междунар. конф., Санкт-Петербург, 7–11 июня 1994 г. / С.-Петерб. гос. аграр. ун-т. – СПб., 1994. – С. 23–24.
13. Мееровский, А. С. Сохранение и эффективное использование мелиорированных земель в Белорусском Полесье / А. С. Мееровский // Европейское Полесье – хозяйственная значимость и экологические риски : материалы Междунар. семинара, г. Пинск, 19–21 июня 2007 г. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.] ; редкол.: И. И. Лиштван [и др.]. – Минск, 2007. – С. 37–39.
14. Мееровский, А. С. Проблемы использования и сохранения торфяных почв / А. С. Мееровский, В. П. Трибис // Новости науки и технологий. – 2012. – № 4 (23). – С. 3–9.
15. Цытрон, Г. С. Антропогенно-преобразованные почвы Беларуси / Г. С. Цытрон. – Минск : Ин-т почвоведения и агрохимии Нац. акад. наук Беларуси, 2004. – 124 с.
16. Атлас почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь / В. В. Лапа [и др.] ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т почвоведения и агрохимии ; под ред. В. В. Лапы, А. Ф. Черныша. – Минск : ИВЦ Минфина, 2017. – 169 с.
17. Эколого-экономическое обоснование мелиорации торфяно-болотных комплексов и технологии их рационального использования / Н. Г. Ковалев [и др.] ; под общ. ред. Ю. А. Мажайского. – М. ; Рязань : РГТУ, 2012. – 300 с.
18. Семененко, Н. Н. Экономическая эффективность комплексного применения средств интенсификации возделывания озимого тритикале на антропогенно-преобразованных торфяных почвах / Н. Н. Семененко, И. И. Вага // Мелиорация. – 2010. – № 2 (64). – С. 123–128.
19. Семененко, Н. Н. Торфяно-болотные почвы Полесья: трансформация и пути эффективного использования / Н. Н. Семененко ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т мелиорации. – Минск : Беларус. навука, 2015. – 282 с.
20. Богдевич, И. М. Итоги и перспективы агрохимических защитных мер на загрязненных радионуклидами землях Беларуси / И. М. Богдевич // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2011. – № 3. – С. 27–39.
21. Богдевич, И. М. Роль плодородия почв в системе защитных мер на загрязненных радионуклидами землях Беларуси / И. М. Богдевич // Плодородие почв и эффективное применение удобрений : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 5–8 июля 2011 г. / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т почвоведения и агрохимии, Белорус. о-во почвоведов ; ред.: В. В. Лапа [и др.]. – Минск, 2011. – С. 13–15.
22. Путятин, Ю. В. Минимизация поступления радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в растениеводческую продукцию / Ю. В. Путятин. – Минск : Ин-т почвоведения и агрохимии, 2008. – 267 с.
23. Алексахин, Р. М. Поведение ^{137}Cs в системе почва – растение и влияние внесения удобрений на накопление радионуклида в урожай / Р. М. Алексахин, И. Т. Моисеев, Ф. А. Тихомиров // Агрохимия. – 1992. – № 8. – С. 127–138.

24. Путьятин, Ю. В. Влияние кислотности дерново-подзолистой супесчаной почвы и доз калийных удобрений на переход ^{137}Cs и ^{90}Sr в яровую пшеницу / Ю. В. Путьятин, Т. М. Серая, О. М. Петрикевич // Почвоведение и агрохимия : сб. науч. тр. / Ин-т почвоведения и агрохимии Нац. акад. наук Беларуси. – Минск, 2004. – Вып. 33. – С. 163–169.
25. Урожай и поступление радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в сельскохозяйственные культуры в зависимости от доз калийных удобрений / И. М. Богдевич [и др.] // Почвенные исследования и применение удобрений : межведомств. темат. сб. / Ин-т почвоведения и агрохимии Нац. акад. наук Беларуси. – Минск, 2003. – Вып. 27. – С. 158–169.
26. Роль химии в реабилитации сельскохозяйственных угодий, подвергшихся радиоактивному загрязнению / Н. И. Санжарова [и др.] // Рос. хим. журн. – 2005. – Т. 49, № 3. – С. 26–34.
27. Evans, E. J. Effect of nitrogen on caesium-137 in soils and its uptake by oat plants / E. J. Evans, A. J. Dekker // Canad. J. of Soil Science. – 1969. – Vol. 49, N3. – P. 349–355. DOI: 10.4141/cjss69-048
28. Моисеев, И. Т. К вопросу о влиянии минеральных удобрений на доступность ^{137}Cs из почв сельскохозяйственными растениями / И. Т. Моисеев, Л. А. Рерих, Ф. А. Тихомиров // Агрохимия. – 1986. – № 2. – С. 89–94.
29. Тулина, А. С. Закономерности поступления ^{137}Cs в растения из дерново-подзолистой песчаной почвы при внесении азотных удобрений / А. С. Тулина, Н. Г. Ставрова, В. М. Семенов // Агрохимия. – 2007. – № 11. – С. 61–70.

References

1. Sysoeva A. A. *Experimental research and modeling of the processes determining the mobility of ^{90}Sr and ^{137}Cs in the soil-plant system*. Abstract of doctoral thesis in biology. Obninsk, 2004. 29 p. (in Russian).
2. Warner F., Harrison R. M. (eds.). *Radioecology after Chernobyl: biogeochemical pathways of artificial radionuclides*. Chichester, New York, Toronto, John Wiley & Sons, 1993. 367 p. (Russ. ed.: Applbi L. Dzh., Devell L., Mishra Yu. K., Vois E. Kh. *Puti migratsii iskusstvennykh radionuklidov v okruzhayushchei srede. Radioekologiya posle Chernobylya*. Moscow, Mir Publ., 1999. 511 p.)
3. Moiseev I. T., Agapkina G. I., Rerikh L. A. A study of the behavior of ^{137}Cs in soils and its entry into crops depending on various factors. *Agrokhimiya = Agricultural Chemistry*, 1994, no. 2, pp. 103–118 (in Russian).
4. Shmigel'skaya I. D., Ageets V. Yu. Accumulation of radionuclides by plants depending on the direction of soil formation processes and the degree of hydromorphism. *Pochvy, ikh evolyutsiya, okhrana i povyshenie proizvoditel'noi sposobnosti v sovremennykh sotsial'no-ekonomicheskikh usloviyakh: materialy I s'ezda Belorusskogo obshchestva pochvedov* [Soils, their evolution, protection and increase of productive capacity in modern socio-economic conditions: materials of the I Congress of the Belarusian Soil Science Society]. Minsk, Gomel, 1995, pp. 272 (in Russian).
5. Shmigel'skaya I. D., Efimova I. A., Arastovich T. V. Contamination of perennial grasses with cesium-137 and strontium-90 depending on soil types and properties. *Pochvennye issledovaniya i primeneniye udobrenii: mezhvedomstvennyi tematicheskii sbornik* [Soil research and application of fertilizers: interdepartmental thematic collection]. Minsk, 2001, iss. 26, pp. 270–288 (in Russian).
6. Nisbet A. F., Woodman R. F. Soil-to-plant transfer factors for radiocaesium and radiostrontium in agricultural systems. *Health Physics*, 2000, vol. 78, no. 3, pp. 279–288. DOI: 10.1097/00004032-200003000-00005
7. Gulyakin I. V., Yuditseva E. V., Levina E. M. The influence of soil moisture on the entry of strontium-90 and cesium-137 into plants. *Agrokhimiya = Agricultural Chemistry*, 1976, no. 2, pp. 102–107 (in Russian).
8. Moiseev I. T., Tikhomirov F. A., Rerikh L. A. On the influence of soil moisture on the intake of ^{137}Cs in agricultural plants. *Agrokhimiya = Agricultural Chemistry*, 1974, no. 7, pp. 124–127 (in Russian).
9. Kas'yanchik S. A., Kotovich A. M. Dependence of the Cs-137 transfer to grasses of flood plain meadows on natural and regulated factors. *Fundamental'nye i prikladnye aspekty radiobiologii: biologicheskie efekty mal'nykh doz i radioaktivnoye zagryazneniye sredy (radioekologicheskie i mediko-biologicheskie posledstviya katastrofy na ChAES): tezisy dokladov Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, Minsk, 16–17 aprelya 1998 g.* [Fundamental and applied aspects of radiobiology: biological effects of small doses and radioactive contamination of the environment (radioecological and biomedical consequences of the Chernobyl catastrophe): abstracts of the International scientific conference, Minsk, 16–17 April 1998]. Minsk, 1998, pp. 108 (in Russian).
10. Rerikh L. A., Moiseev I. T. The influence of soil properties on the transformation of ^{137}Cs forms and its entry into agricultural plants. *Agrokhimiya = Agricultural Chemistry*, 1989, no. 8, pp. 96–100 (in Russian).
11. Petryaev E. P., Sokolik G. A., Ivanova T. G., Morozova T. K., Sumrach N. G. Dynamics of vertical migration of Chernobyl radionuclides in soil cover. *Geokhimicheskie puti migratsii iskusstvennykh radionuklidov v biosfere: tezisy dokladov V konferentsii, g. Pushchino, dekabr' 1991 g.* [Geochemical ways of migration of artificial radionuclides in biosphere: abstracts of the 5th conference, Pushchino, December 1991]. Pushchino, 1991, pp. 25 (in Russian).
12. Sokolik, G. A. The influence of fulvic and humic acids on the mechanisms of radionuclides ^{137}Cs and ^{90}Sr accumulation by plant cells. *Radioekologiya torfyanykh pochv: materialy Mezhdunarodnoi konferentsii, Sankt-Peterburg, 7–11 iyunya 1994 g.* [Radioecology of peat soils: materials of the International conference, St. Petersburg, June 7–11, 1994]. St. Petersburg, 1994, pp. 23–24 (in Russian).
13. Meerovskii A. S. Preservation and effective use of reclaimed lands in the Belarusian Polesie. *Evropeiskoe Poles'e – khozyaistvennaya znachimost' i ekologicheskie riski: materialy Mezhdunarodnogo seminara, g. Pinsk, 19–21 iyunya 2007 g.* [European Polesie – economic significance and environmental risks: materials of the International workshop, Pinsk, June 19–21, 2007]. Minsk, 2007, pp. 37–39 (in Russian).
14. Meerovskii A. S., Tribis V. P. Problems of the use and preservation of peat soils. *Novosti nauki i tekhnologii* [News of Science and Technologies], 2012, no. 4 (23), pp. 3–9 (in Russian).

15. Tsytron G. S. *Anthropogenically-transformed soils of Belarus*. Minsk, Institute of Soil Science and Agrochemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, 2004. 124 p. (in Russian).
16. Lapa V. V., Chernysh A. F. (ed.) *Atlas of soils of agricultural lands of the Republic of Belarus*. Minsk, IVC of the Ministry of Finance, 2017. 169 p. (in Russian).
17. Mazhaikii Yu. A. (ed.) *Ecological and economic substantiation of reclamation of peat-bog complexes and technology of their rational use*. Moscow, Ryazan, Ryazan State Agrotechnological University, 2012. 300 p. (in Russian).
18. Semenenko N. N., Vaga I. I. Economic efficiency of integrated application of intensification means of winter triticale cultivation on anthropogenically transformed peat soils. *Melioratsiya* [Reclamation], 2010, no. 2 (64), pp. 123–128 (in Russian).
19. Semenenko N. N. *Peat-bog soils of Polesie: transformation and ways of effective use*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2015. 282 p. (in Russian).
20. Bogdevich I. M. Results and prospects of agrochemical protective measures on the lands contaminated with radionuclides in Belarus. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2011, no. 3, pp. 27–39 (in Russian).
21. Bogdevich I. M. The role of soil fertility in the system of protective measures on the lands contaminated with radionuclides in Belarus. *Plodorodie pochv i effektivnoe primeneniye udobrenii: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Minsk, 5–8 iyulya 2011 g.* [Soil fertility and effective application of fertilizers: materials of the International scientific and practical conference, Minsk, July 5–8, 2011]. Minsk, 2011, pp. 13–15 (in Russian).
22. Putyatin Yu. V. *Minimization of ^{137}Cs and ^{90}Sr radionuclide entry into plant products*. Minsk, Institute of Soil Science and Agrochemistry, 2008. 267 p. (in Russian).
23. Aleksakhin R. M., Moiseev I. T., Tikhomirov F. A. Behavior of ^{137}Cs in the soil-plant system and the influence of fertilization on radionuclide accumulation in the crop. *Agrokimiya = Agricultural Chemistry*, 1992, no. 8, pp. 127–138 (in Russian).
24. Putyatin Yu. V., Seraya T. M., Petrikevich O. M. Influence of acidity of sod-podzolic sandy loam soil and doses of potassium fertilizers on the transfer of ^{137}Cs and ^{90}Sr to spring wheat. *Pochvovedenie i agrokimiya: sbornik nauchnykh trudov* [Soil Science and Agrochemistry: a collection of scientific papers]. Minsk, 2004, iss. 33, pp. 163–169 (in Russian).
25. Bogdevich I. M., Tarasyuk S. V., Shmigel'skaya I. D., Seraya T. M., Putyatin Yu. V., Efimova I. A., Ochkovskaya L. V. Harvest and entry of radionuclides ^{137}Cs and ^{90}Sr in agricultural crops depending on the doses of potassium fertilizers. *Pochvennyye issledovaniya i primeneniye udobrenii: mezhvedomstvennyi tematicheskii sbornik* [Soil research and application of fertilizers: interdepartmental thematic collection]. Minsk, 2003, iss. 27, pp. 158–169 (in Russian).
26. Sanzharova N. I., Sysoeva A. A., Isamov N. N., Aleksakhin R. M., Kuznetsov V. K., Zhigareva T. L. The role of chemistry in the rehabilitation of agricultural lands exposed to radioactive contamination. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal = Russian Journal of General Chemistry*, 2005, vol. 49, no. 3, pp. 26–34 (in Russian).
27. Evans E. J., Dekker A. J. Effect of nitrogen on caesium-137 in soils and its uptake by oat plants. *Canadian Journal of Soil Science*, 1969, vol. 49, no. 3, pp. 349–355. DOI: 10.4141/cjss69-048
28. Moiseev I. T., Rerikh L. A., Tikhomirov F. A. To the issue of the influence of mineral fertilizers on the uptake of ^{137}Cs by agricultural plants from soils. *Agrokimiya = Agricultural Chemistry*, 1986, no. 2, pp. 89–94 (in Russian).
29. Tulina A. S., Stavrova N. G., Semenov V. M. Regularities of ^{137}Cs uptake by plants from sod-podzolic sandy soil with the application of nitrogen fertilizers. *Agrokimiya = Agricultural Chemistry*, 2007, no. 11, pp. 61–70 (in Russian).

Сведения об авторах

Цыбулько Николай Николаевич – доктор с.-х. наук, доцент, зам. директора, Институт почвоведения и агрохимии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Казинца, 90, 220108, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: nik.nik1966@tut.by

Шашко Александр Викторович – младший научный сотрудник, Институт радиологии (ул. Федюнинского, 16, 246000, г. Гомель, Республика Беларусь). E-mail: shashkoalexandr@rambler.ru

Information about authors

Tsybulka Mikalai M. – D.Sc. (Agriculture), Associate Professor. The Institute of Soil Science and Agrochemistry, the National Academy of Sciences of Belarus (Kazintsa Str., 90, 220108 Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nik.nik1966@tut.by

Shashko Alexander V. – the Institute of Radiology (16 Fedyuninsky Str., 246000 Gomel, Republic of Belarus). E-mail: shashkoalexandr@rambler.ru